



VŠB - Technická univerzita Ostrava

**Topografie povrchů a magnetických
vlastností nanostruktur studovaných pomocí
AFM / MFM**

**Surface and magnetic properties of materials
studied by AFM / MFM**

Autor:

Petr Stuchlík

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Aleš Hendrych, Ph.D.

Ostrava, 2013

Zadání bakalářské práce

Student:

Petr Stuchlík

Studijní program:

B3942 Nanotechnologie

Studijní obor:

3942R001 Nanotechnologie

Téma:

Topografie povrchů a magnetických vlastností nanostruktur
studovaných pomocí AFM/MFM
Surface and magnetic properties of materials studied by AFM/MFM

Zásady pro vypracování:

Bakalářská práce bude založena na studiu povrchových strukturních a magnetických vlastností vybraných typů materiálů různého chemického a fázového složení a odlišné struktury (amorfni, nanokrystalické, krystalické). K výzkumu bude využita metoda založená na mikroskopii atomárních a magnetických sil (AFM/MFM). Přístroj je vybaven skenující mechanickou nebo magnetickou sondou, které umožňují zobrazit topografii povrchu a změny v magnetickém chování povrchových mikrostrukturních oblastí při vysokém rozlišení. Práce bude zaměřena na seznámení se s přístrojem a jeho použitím ke studiu různých typů materiálů a bude rozdělena do následujících bodů:

- 1) Nastudovat měřicí princip, vznik a detekci atomárních sil (AFM), seznámit se s ovládacími mechanismy přístroje včetně základní obsluhy.
- 2) V případě MFM diskutovat funkční mechanismus společný pro většinu mikroskopii, využívajících skenující sondu, charakter dalekodosahové magnetické síly, povahu interakce magnetického hrotu se vzorkem, detekční režimy.
- 3) Na vybraných materiálech aplikovat metodu AFM/MFM, zvládnout nastavení měřicích parametrů, zpracovat a vyhodnotit měřené veličiny s cílem dosažení reprodukovatelných výsledků.
- 4) Zhodnotit dosažené výsledky s ohledem na strukturu a vlastnosti studovaných materiálů.

The thesis will be based on study of the surface structural and magnetic properties of materials with respect to their different chemical and phase composition and different structure (amorphous, nanocrystalline, crystalline). Atomic and/or magnetic force microscopy (AFM/MFM) technique uses a mechanical or magnetic scanning probe for the surface topography investigations and the changes in magnetic behavior of surface microstructural regions with a high resolution. The aim of thesis is to learn an instrument control and to demonstrate its availability for a research of various materials. The study will be divided into following points:

- 1) To learn a measuring principle, origin and detection of atomic forces (AFM), device control and service mechanism.
- 2) In case of MFM to discuss the functional mechanism common for the most of the scanning probe-based microscopes, a character of the long-range magnetic forces acting between the tip and the sample surface, detection regimes.
- 3) To apply the AFM/MFM method on selected materials, to evaluate the measured quantities from the viewpoint of reproducibility of results.
- 4) To evaluate obtained results in relation to the structure and properties of studied materials.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) R. Kubínek, M. Vůjtek, M. Mašláň, Mikroskopie skenující sondou, Univerzita Palackého, 2003.
- 2) P. Samori, Scanning probe microscopies beyond imaging, Wiley-Wch Verlag GmbH, 2006.
- 3) Z. H. Wang, Characterization of nanophase materials, Wiley-Wch Verlag GmbH, 2000.
- 4) G. Binnig et al., Atomic force microscopy, Phys. Rev. Lett., 56, 930, 1986.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **RNDr. Ing. Aleš Hendrych, Ph.D.**

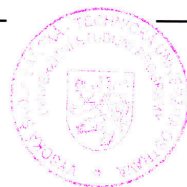
Konzultant bakalářské práce: Ing. Ondřej Životský, Ph.D.


Datum zadání: 16. 11. 2012

Datum odevzdání: 15. 05. 2013



prof. Dr. RNDr. Jiří Luňáček
vedoucí katedry





prof. Ing. Petr Noskovič, CSc.
prorektor pro studium

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány na konci práce.

V Ostravě dne 15.5.2013

.....

podpis autora

Prohlašuji, že,

- jsem byl seznámen s tím, že se na mou bakalářskou práci plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB - TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1988 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 15.05.2013

.....

jméno a příjmení studenta

adresa trvalého bydliště:

Podroužkova 1677/2, Ostrava - Poruba

Abstrakt

Bakalářská práce si klade za cíl využít metodu založenou na mikroskopii skenovací sondou AFM / MFM ke studiu povrchových strukturních a magnetických vlastností vybraných typů materiálů různého chemického a fázového složení a to včetně odlišné struktury (amorfni, nanokrystalické, krystalické). Jedná se o metodu charakterizace povrchu pomocí mechanické sondy, která zobrazuje topografii povrchu a změny v magnetickém chování mikrostrukturních oblastí, při vysokém rozlišení. Zhodnocení naměřených veličin je realizováno s cílem dosáhnout reprodukovatelných výsledků a to s ohledem na vlastnosti studovaných materiálů.

Abstract

Bachelor thesis aims to use a method based on scanning probe microscopy AFM / MFM to study surface structural and magnetic properties of selected materials of different chemical and phase composition including different structure (amorphous, nanocrystalline, crystalline). This is a method of characterizing the surface using a mechanical probe, which shows the surface topography and changes in the magnetic behavior of microstructural regions with high resolution. Evaluation of the measured values is implemented in order to achieve reproducible results with regard to the properties of the studied materials.

Obsah

1. Úvod	9
1.1 Historie	10
1.1.1 Skenovací tunelovací mikroskopie	10
1.1.2 Mikroskopie atomárních sil	10
1.1.3 Mikroskopie magnetických sil	11
1.2 Obecné schéma mikroskopu SPM	11
1.2.1 Působící síly	12
1.2.2 Detekční režimy	13
2. Mikroskopie magnetických sil	16
2.1 Teorie MFM	16
2.2 Detekce v MFM	17
2.2.1 Statický režim	17
2.2.2 Dynamický režim	17
2.3 Interakce hrot - vzorek	18
2.3.1 Magnetické interakce	18
2.4 Separace magnetických a topografických efektů	19
3. Metoda a materiál	20
3.1 Mikroskop NTegra Prima	20
3.1.1 Funkční schéma mikroskopu	20

3.2	Měřicí mechanismus	24
3.3	Granátové vrstvy (bublinkové paměti)	26
3.4	Paměťová média	27
3.5	FeAl	28
4.	Závěr	33
5.	Literatura	34

Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Název
k	konstanta pružnosti
k_c	výsledná konstanta pružnosti
Δz	výchylka raménka
F	síla
\AA	angström
m	hmotnost
ω_0	volná rezonanční frekvence
$\frac{\partial F}{\partial z}$	gradient magnetické síly
E	potenciál magnetického pole
\vec{M}_h	magnetizace hrotu
\vec{H}_{vz}	intenzita magnetického pole vzorku

Zkratka	Název
AFM	Mikroskopie atomárních sil
AS	Dynamický režim
DC	Statický režim
MFM	Mikroskopie magnetických sil
SPM	Mikroskopie skenující sondou
STM	Skenovací tunelová mikroskopie
MOKE	Magnetooptický Kerrův jev
VSM	Vibrační magnetometrie

1. Úvod

Jako mikroskopii se skenující sondou (SPM) označujeme širokou škálu technik, které jsou schopny měřit fyzikální a chemické vlastnosti různých typů materiálů při vysokém rozlišení, jejichž společným rysem je využití mechanického pohybu měřící sondy po povrchu vzorku.

Vzhledem k malé vzdálenosti sondy od povrchu vzorku (řádově stovky nm) pracují metody v oblasti blízkého pole¹, přičemž lze získat pouze lokální informaci o měřeném materiálu. Chceme-li tedy charakterizovat daný vzorek v určeném rozsahu, je nutno provádět měření postupně "proskenováním" (sonda se pohybuje řádek po řádku). V posledních 20. letech si prošly SPM metody značným vývojem, jež vyústil v implementaci mnoha dalších typů mikroskopií využívajících rozdílné interakce mezi hrotem a vzorkem.

V této bakalářské práci využijeme právě techniky mikroskopie atomárních a magnetických sil (AFM / MFM) k charakterizaci povrchových strukturních a magnetických vlastností vybraných typů materiálů. Bakalářská práce je systematicky rozdělena do dvou celků. V první, teoretické části, je stručně shrnut historický přehled SPM metod se zřetelem ke klíčovým technikám AFM / MFM použitým v této práci. Dále je pak diskutován měřící princip, vznik a detekce působících sil a celkový funkční mechanismus společný pro většinu SPM technik. V případě MFM je krátce popsán charakter dalekodosahové magnetické síly, povaha interakce magnetického hrotu se vzorkem a detekční režimy.

Druhá část je pak věnována experimentálním aspektům, tedy popisu platformy mikroskopu NTegra Prima, ve smyslu technických detailů a principů měření (pákové optické detekce, metoda dvojího průchodu) a použitému materiálu. Analýzy byly provedeny pro dva typy dobře definovaných materiálů (z hlediska působení magnetických sil) a to pro povrch paměťových zařízení (harddisk) a granátových vrstev (dříve hojně využívaných jako bub-

¹Metody při níž nejsme limitováni difrakcí světla, jak je tomu u optických mikroskopů [1]

linkové paměti). Dalšími zkoumanými materiály byly slitiny na bázi FeAl s rozdílným zastoupením železa a hliníku (% at. $\text{Fe}_{72}\text{Al}_{28}$, $\text{Fe}_{67}\text{Al}_{33}$, $\text{Fe}_{65}\text{Al}_{35}$), z důvodů velmi zajímavých magnetických vlastností.

1.1 Historie

První úspěšná koncepce skenujícího tunelujícího mikroskopu (STM) provedená v laboratořích IBM roku 1981 přispěla významnou měrou k rozvoji mikroskopovacích metod využívajících skenující sondu. Vzhledem k enormnímu množství SPM technik, které se od této doby vyvinuly, bychom krátce zmínili pouze STM, AFM, MFM.

1.1.1 Skenovací tunelovací mikroskopie

První mikroskop založený na využití kvantové mechaniky, konkrétně tunelového jevu, byl vytvořen roku 1981 dvojicí Heinrich Rohrer a Gerd Binnig [2].

Metoda spočívá ve sledování protékajícího proudu, přičemž nedochází ke kontaktu mezi vodivým hrotem a vzorkem. Velikou výhodou této metody je poskytnutí kvalitních snímků s vysokým rozlišením bez jakýchkoli speciálních úprav vzorku, jako např. pokovování u elektronové mikroskopie. Nevýhodou však je, že zobrazen je pouze povrch vzorku a to až po naskenování stanovené oblasti.

1.1.2 Mikroskopie atomárních sil

Nutnost vyvinout obdobnou techniku, která by však dokázala mapovat nevodivé vzorky, vedla k implementaci techniky využívající různá silová působení vznikající při přiblížení měřící sondy k povrchu materiálu - AFM 1986 [3].

Princip AFM spočívá ve využití sondy s ostrým hrotem k rastrování povrchu vzorku. Velikost hrotu je v řádech desítek nanometrů a hrot je připevněn na raménko. Při skenování dochází k interakcím mezi povrchem vzorku a hrotem, které způsobí prohnutí či natočení raménka. Povrchové síly jsou mapovány těsným přiblížením hrotu k povrchu, přičemž přitažlivé nebo odpuzivé síly ohýbají raménko [4]. Prohnutí nebo natočení raménka je následně detekováno, obvykle opticky (laserem), a graficky zobrazeno počítačem.

1.1.3 Mikroskopie magnetických sil

Využití magnetických sil ke studiu magnetických materiálů vyústilo ke konstrukci MFM a to i přes to, že dosahovaná rozlišení (řádově 20 nm) byla v porovnání s STM a AFM menší.

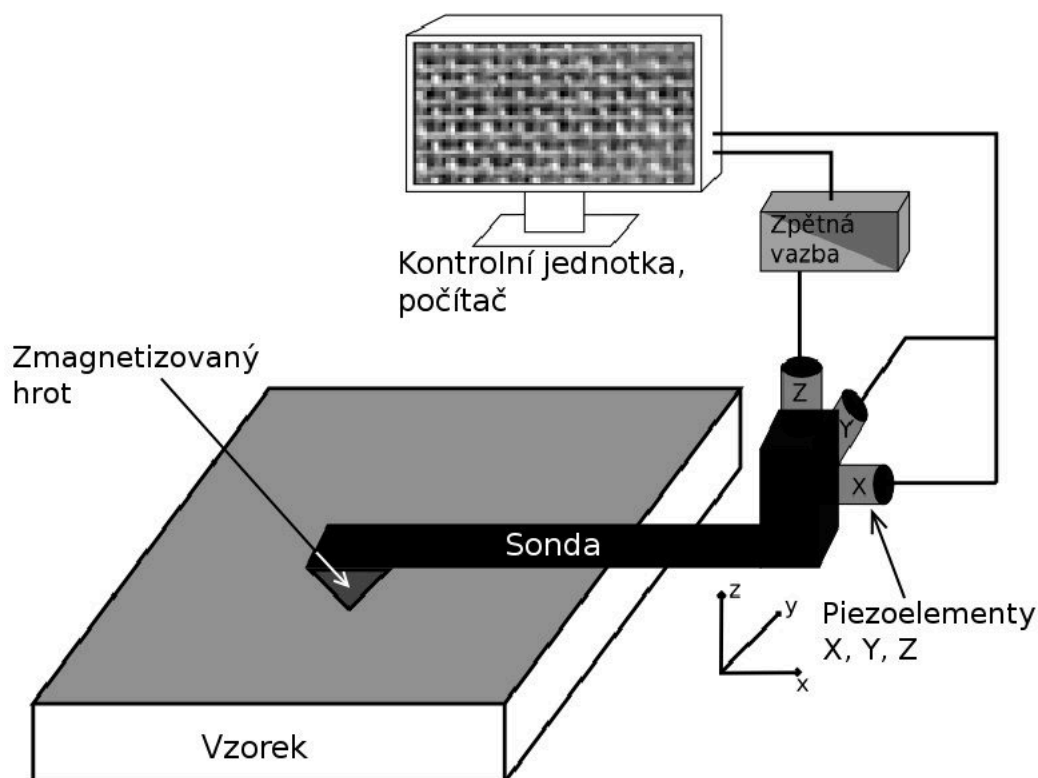
Sestavení prvního mikroskopu magnetických sil je připisováno dvojici Martin a Wicramasinghe (1987) [5]. Mikroskop byl sestaven na principech AFM, přičemž k detekci bylo využito magnetických dalekodosahových sil. Základ tvořil ocelový drátek o průměru 25 μm , který sloužil jako raménko a současně hrot. Drátek byl na jednom konci mechanicky zúžen (zaostřen) a elektrochemicky leptán tak, že konečný průměr hrotu odpovídal zhruba 50 nm. V poslední fázi byl ostrý konec ohnut do pravého úhlu. Pomocí optického interferometru byla měřena výchylka raménka, a tím i vynaložená síla [6].

1.2 Obecné schéma mikroskopu SPM

Mikroskopie skenující sondou označuje soubor experimentálních metod využívajících ke studiu struktury povrchů vzorku [7]. Tyto metody jsou schopny získat trojrozměrné zobrazení struktury s rozlišením v atomárním měřítku.

Jako zařízení zprostředkovávající interakci se využívá sonda umístěná v držáku, která mapuje povrch vzorku a detekuje specifické silové interakce mezi povrchem a ostrým koncem sondy (hrotem). Samotná sonda je tedy tvořena ostrým hrotem (tip) a raménkem (cantilever) a je připevněna k mechanické části, která sondou pohybuje ve třech směrech x , y , z . Tato mechanická část se nazývá skener a jedná se vlastně o piezoelektrické prvky, které umožňují se sondou pohybovat v různých směrech, popřípadě ji přibližovat nebo oddalovat. Silová interakce, ke které dochází mezi hrotem a povrchem vzorku ovlivňuje vychýlení hrotu. Tato změna se přes prvky zpětné vazby projeví ve zkrácení nebo prodloužení piezoelementu a je registrována pomocí počítače, který výsledný snímek zobrazí.

Obecné schéma SPM je znázorněno na obr. 1. 1. Další uspořádání mikroskopu a vlastností použitých součástí se mění podle toho pro jakou konkrétní odnož mikroskopie SPM je daný mikroskop určen [4].



Obr. 1. 1. - Základní konstrukční schéma mikroskopie skenující sondou.

1.2.1 Působící síly

Myšlenka využití tzv. parazitních sil, vznikajících při přiblížení měřící sondy ke vzorku, k měření, úzce souvisí se vznikem mikroskopie atomárních sil. I přes to, že je obtížné přesně vymezit působení daných sil (nutno vzít v úvahu mnoho faktorů) vzhledem ke vzdálenosti mezi hrotem a vzorkem, lze tyto síly rozdělit na krátkodosahové a dalekodosahové.

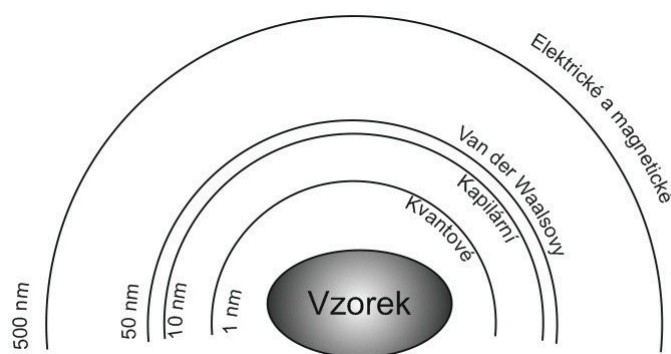
Typickými představiteli krátkodosahových sil jsou především Pauliho a iontové odpuzování, fyzikální sorpce a chemisorpce (vazba mezi hrotem a vzorkem), kovová adheze (při těsném přiblížení dvou kovů dojde k přesunu elektronů a vzniku přitažlivé síly), tření, elasticita (hlavně u vrstevných materiálů), plastická deformace apod. [8].

Dalšími silami, které se projevují téměř při každém měření a jejich dosah je v řádech od desítek do stovek nm od povrchu vzorku jsou, Van der Waalsovy síly. Van der Waalsovy síly jsou jedním z typů projevů elektromagnetických dipól - dipól interakcí probíhajících mezi atomy. Van der Waalsovy síly jsou přímo závislé na tvarech jak hrotu, tak povrchu [9].

Při zkoumání vzorků za normálních atmosférických podmínek dochází, vlivem přirozené

vzdušné vlhkosti, k pokrytí vzorku tenkou vrstvou vody. Pokud hrot projde touto tenkou vrstvou, dojde k vytvoření menisku. Mezi vrstvou a hrotem vznikají silné přitažlivé kapilární síly [10].

Hlavní zástupci sil dalekého dosahu jsou síly elektrostatické a magnetické. Jako elektrostatickou označujeme sílu, kterou působí elektrické pole na těleso s elektrickým nábojem. Elektrické pole může mít původ v jiných tělesech s elektrickým nábojem nebo v proměnném magnetickém poli. Elektrickou sílu mezi dvěma bodovými náboji lze popsat pomocí Coulombova zákona [11]. Magnetické interakce hrotu s povrchem vzorku budou podrobněji popsány v následujících kapitolách.



Obr. 1. 2. - Rozložení sil z hlediska jejich působení a charakteru.

1.2.2 Detekční režimy

Činnost SPM (AFM / MFM) mikroskopu lze rozdělit do několika základních režimů. Kontaktní režim, kdy se hrot sondy přímo dotýká povrchu vzorku a nekontaktní režim, při kterém se hrot "vznáší" nad povrchem vzorku. Třetí režim je kombinací dvou předešlých, označuje se jako poklepový (tapping) mód.

Kontaktní režim

Kontaktní režim, někdy také označován jako režim odpudivý, pracuje v přímém dotyku hrotu se vzorkem. Raménko s hrotem má tuhost nižší než je vazebná síla mezi atomy vzorku. Změna topografie povrchu způsobí ohyb a vychýlení raménka.

Při přibližování hrotu k povrchu vzorku se nejprve začne projevovat van der Waalsova přitažlivá síla, která se uplatňuje do překrytí elektronových oblaků atomů. Po překryvu

dochází k postupnému útlumu přitažlivých sil a zesílení vlivu elektrostatického odpuzování. Výsledná síla se blíží nule, jestliže vzdálenost mezi atomy dosáhne přibližně délky chemické vazby [3]. Proces přibližování zobrazuje obr. 1.3.



Obr. 1. 3. - Závislost působících meziatomových sil na vzdálenosti hrotu od povrchu vzorku.

Kontaktní režim lze dále rozdělit do dvou modifikací.

1. S konstantní výškou - výška sondy nad vzorkem zůstává konstantní, měří se změna prohnutí raménka.
2. S konstantní silou - prohnutí raménka se udržuje konstantní, mění se vzdálenost měřicí hlavy od povrchu vzorku.

Nekontaktní režim

Při nekontaktním režimu se raménko s hrotem nedotýká vzorku, ale pohybuje se nad jeho povrchem v určité vzdálenosti.

Síla působící na hrot je mnohem menší než je tomu u kontaktního režimu. Díky takto malým působícím silám a absenci přímého dotyku hrotu s povrchem vzorku lze nekontaktní režim využít i k měření velmi měkkých materiálů, materiálů s pružným povrchem a materiálů, u kterých nesmí dojít ke kontaminaci povrchu hrotem.

Měření tedy probíhá tak, že je raménko rozkmitáno na své rezonanční frekvenci. Amplituda výchylky však nesmí překročit určitou vzdálenost, při které by došlo ke kontaktu hrotu se vzorkem.

Poklepový režim

Poklepový režim je kombinací dvou předchozích režimů. Raménko s hrotem se pohybuje nad povrchem vzorku a kmitá tak, že dochází k občasnému kontaktu s povrchem. Sledují se změny rezonanční frekvence jako je tomu u nekontaktního režimu, nicméně teoretická interpretace poklepového režimu vyžaduje sofistikovanější popis, zejména díky kontaktu hrotu se vzorkem.

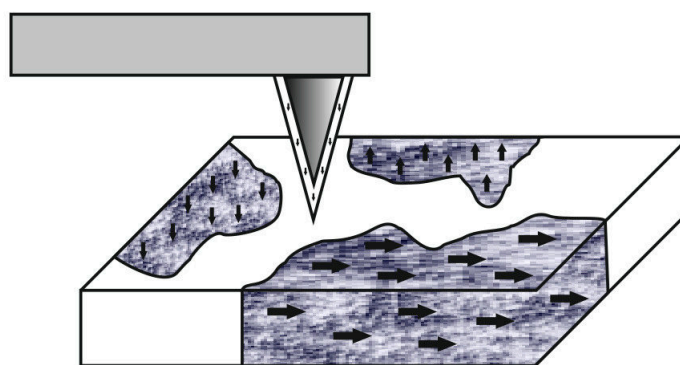
Dobrého rozlišení, srovnatelného s dotykovým režimem, je docíleno volbou bodu nejbližšího kontaktu ve vzdálenosti několika nm a volbou takové frekvence kmitů, aby se do tohoto bodu hrot dostal několikrát než se laterálně posune o svůj průměr [4].

2. Mikroskopie magnetických sil

Vzhledem k celkovému pojetí práce bychom se v následující části věnovali hlavně teoretickým parametrům, které MFM využívá.

2.1 Teorie MFM

Princip, na kterém mikroskop magnetických sil pracuje, je podobný principům AFM, s tím rozdílem, že metoda MFM využívá dalekodosahové magnetické síly vyvolané vzorkem na zmagnetizovaný hrot. Jedná se tedy o nekontaktní režim. Mikroskopie magnetických sil umožňuje prostorově zobrazit změny magnetické síly na povrchu vzorku. Pro správné zobrazení je nutné mít hrot pokryt feromagnetickou vrstvou. Sonda se zmagnetizovaným hrotem je umístěna do vzdálenosti, při které již působí jen magnetické síly. Obecné schéma MFM zobrazuje obr. 2. 1.



Obr. 2. 1 - Princip skenování metodou MFM.

2.2 Detekce v MFM

Dle systému detekce pohybu sondy, konkrétně raménka, lze MFM rozdělit do dvou režimů.

- statický režim (DC)
- dynamický režim (AC)

2.2.1 Statický režim

Raménko je přímo vychylováno magnetickou silou, která působí na feromagnetický hrot. V tomto režimu se sleduje výchylka raménka, nejčastěji opticky, jakožto funkce polohy. Výslednou sílu, která je odpovědná za vychýlení raménka, lze zapsat jako

$$F = k\Delta z, \quad (2.1)$$

kde k reprezentuje konstantu pružnosti raménka a Δz výchylku raménka [12].

2.2.2 Dynamický režim

V tomto detekčním režimu je sledována působící magnetická síla, jejíž vliv se projeví ve formě změny rezonanční frekvence, amplitudy a fáze oscilujícího raménka. Raménko lze v tomto režimu chápat jako harmonický oscilátor. Velikost amplitudy kmitajícího raménka bývá obvykle v desítkách až stovkách Å a bývá připevněno na piezoelektrický krystal, který raménkem kmitá s frekvencí blízkou rezonanční frekvenci raménka ω_0 , kterou lze psát

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_c}{m}}, \quad (2.2)$$

kde m je hmotnost raménka a hrotu a k_c můžeme chápat jako výslednou konstantu pružnosti. Přiblížíme-li hrot blíže k povrchu vzorku, dojde k působení magnetické síly na feromagnetický hrot a změně gradientu magnetické síly v důsledku změny vzdálenosti hrotu od povrchu vzorku. Tuto změnu můžeme vyjádřit jako $\frac{\partial F}{\partial z}$. Toto silové působení hrotu můžeme chápat jako tzv. interakční konstantu, kterou je nutno započíst do výsledné konstanty pružnosti. Dostáváme

$$k_c = k - \frac{\partial F}{\partial z}, \quad (2.3)$$

rezonanční frekvence harmonického oscilátoru tedy bude

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k - \frac{\partial F}{\partial z}}{m}}. \quad (2.4)$$

Změna rezonanční frekvence je tedy úměrná gradientu magnetické síly (interakci) mezi hrotem a vzorkem [12].

Využívají se následující způsoby detekce změny rezonanční frekvence raménka [13].

1. Měření amplitudy

Frekvence oscilujícího raménka se nemění, je vyšší nebo nižší než je rezonanční. Změna rezonanční frekvence má za následek změnu výchylky raménka. Pro tento způsob nejsou vhodná raménka s pomalým tlumením oscilací.

2. Měření fázového posunu

Tento způsob pracuje na podobném principu jako v případě měření amplitudy. Při působení gradientu magnetické síly se mění společně s amplitudou i fáze (fázový posun).

3. Měření rezonanční frekvence

Raménko osciluje přesně s rezonanční frekvencí ω_0 . Změny jsou detekovány přímo.

2.3 Interakce hrot - vzorek

Jak již bylo uvedeno, MFM pracuje primárně s magnetickými silami dlouhého dosahu. Důležitým faktorem pro znázornění vzájemné interakce zůstává vzdálenost mezi magnetickým hrotem a povrchem vzorku. Dostane-li se hrot příliš blízko povrchu, začínají se uplatňovat síly s krátkým dosahem a přestanou se uplatňovat síly magnetické. Výsledný obraz zobrazuje topografii povrchu namísto zobrazení magnetického kontrastu.

2.3.1 Magnetické interakce

Přiblížením zmagnetizovaného hrotu do vnějšího magnetického pole vzorku vzniká magnetický potenciál E [8], který lze popsat jako

$$E = -\mu_0 \int_h \vec{M}_h \cdot \vec{H}_{vz} dV_h, \quad (2.5)$$

kde integrujeme přes celý objem hrotu, přičemž \vec{M}_h je magnetizace hrotu a \vec{H}_{vz} je intenzita magnetického pole vzorku.

Samotný potenciál naměřit nelze, detekujeme však magnetickou sílu nebo gradient magnetické síly. Magnetická síla může být vyjádřena jako gradient magnetického potenciálu.

$$\vec{F} = -\nabla E = \mu_0 \int_h \vec{M}_h \cdot \vec{H}_{vz} dV_h. \quad (2.6)$$

2.4 Separace magnetických a topografických efektů

Jelikož síly vytvářející magnetický a topografický kontrast nejsou ostře odděleny, dochází při měření k prolínání obou efektů. Jde tedy zejména o odstranění vlivu sil, které mají krátkodosahový charakter, protože přispívají spíše ke znázornění topografie a kazí tak magnetický obraz [10].

K dosažení dobrého magnetického kontrastu bez informací o topografii je možno využít několika způsobů [14].

1. Zvětšení vzdálenosti hrotu od povrchu.

Tato metoda vychází z dlouhého dosahu magnetických sil a předpokládá zvyšování magnetického kontrastu s rostoucí vzdáleností. Dochází však ke snižování rozlišení.

2. Přivedení sinusového napětí mezi hrot a vzorek.

Pomocí amplitudy přivedeného napětí se udržuje konstantní vzdálenost hrotu od vzorku. Magnetické interakce určuje statická výchylka raménka.

3. Víceprůchodové techniky.

Hojně využívaná technika založena na principu víceprůchodového skenování vzorku [15]. Nejprve se provede skenování čistě topografických vlastností. Výstupní signál prvního průchodu je zaznamenán a slouží jako referenční signál pro druhý průchod. Při druhém průchodu se pomocí zpětné vazby přesně kopíruje topografický signál a to v jisté výšce, která minimalizuje vliv sil podílejících se na zkreslení následného např. magnetického obrazu. Výsledný signál již zobrazuje magnetický kontrast neovlivněný topografií vzorku. V některých případech je nutný ještě třetí průchod, například k odstranění vlivu elektrického pole povrchu vzorku.

3. Metoda a materiál

Veškerá měření probíhala na platformě SPM mikroskopu NTegra Prima (NT-MDT) za normálních podmínek (na vzduchu).

Byl využit semikontaktní mód měření s hroty určenými pro magnetické měření, které sestávají z křemíkového základu pokrytého vrstvou CoCr.

K prokázání vhodnosti metody byly v první části ke studiu vybrány vzorky s dobře definovanou odpovědí na magnetický signál tj. paměťové médium a bublinkové paměti na bázi granátů. V další části pak intermetalika FeAl s rozdílným zastoupením prvků ve struktuře, u nichž je diskutován zejména povrchový magnetismus v návaznosti na probíhající výzkum těchto slitin.

3.1 Mikroskop NTegra Prima

Multifunkční zařízení s vyměnitelnými moduly využívající se v mikroskopii skenující sondou.

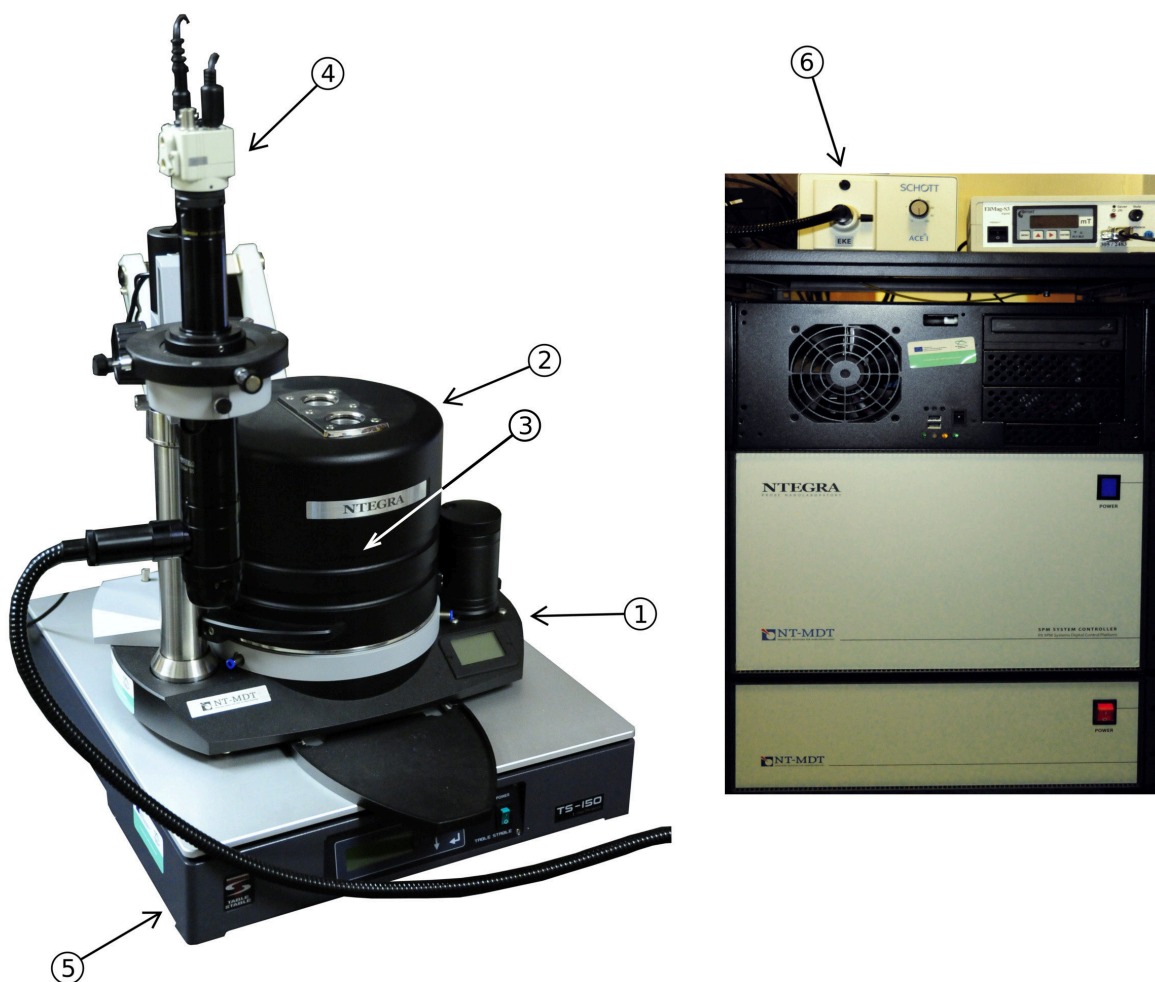
Platforma je schopna provádět více než 40 měřících metod a získávat tak fyzikální a chemické vlastnosti povrchu při velkém rozlišení. Jsme schopni měřit jak na vzduchu, tak v kapalině nebo v řízené atmosféře. Skenovat je možno pouze pohybem sondy, kdy vzorek zůstává stabilní [16].

3.1.1 Funkční schéma mikroskopu

Mikroskop se skládá z těchto hlavních částí (Obr. 3. 1):

1. základní jednotka
2. ochranný kryt

3. měřicí modul
4. zobrazovací systém
5. anti - vibrační stolec
6. kontrolní systém

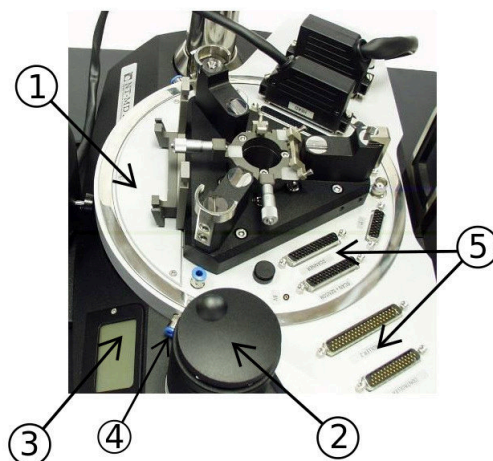


Obr. 3. 1 - Sestava mikroskopu NTegra Prima.

Základní jednotka

Funkcí základní jednotky (1 - obr 3. 2) je přiblížení vloženého vzorku k sondě. Manuální přiblížení lze provést krokovým motorem (2 - obr 3. 2). Dále lze na základní jednotce sledovat teplotu a vlhkost (3 - obr 3. 2) v okolí vzorku, tyto veličiny jsou měřeny senzory.

Je také možné měření v ochranné atmosféře či vakuu. K tomu slouží přívodní trubice (4 - obr 3. 2). Konektory (5 - obr 3. 2) na základní jednotce slouží k propojení s kontrolorem a doplňkovými moduly.



Obr. 3. 2 - Základní jednotka.

Ochranný kryt

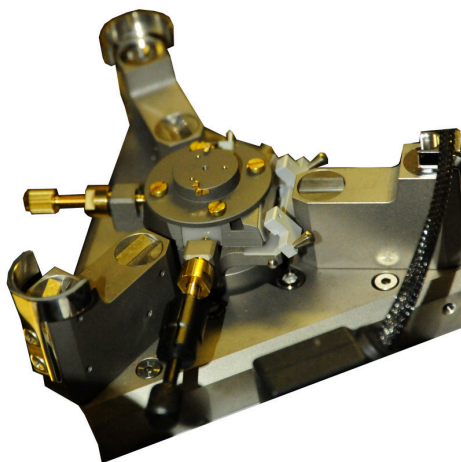
Ochranný kryt se využívá k odstínění elektromagnetických polí, akustického hluku a teplotních výkyvů. Další vlastností krytu je možnost vytvoření ochranné atmosféry nebo vakua.

Měřicí modul

Měřicí modul je složen z následujících základních komponentů.

- Vyměnitelná základna

Je uložena přímo v základní jednotce, kde je upevněna pomocí šroubů. Základna je osazena držákem vzorku nebo také skenerem, který vzorkem pohybuje. Kombinací skeneru a skenující měřící hlavy lze dosáhnout zvětšení skenované plochy vzorku. Používaný mikroskop byl vybaven pouze držákem vzorku (obr. 3. 3).



Obr. 3. 3 - Vyměnitelná základna s upevněným držákem vzorku.

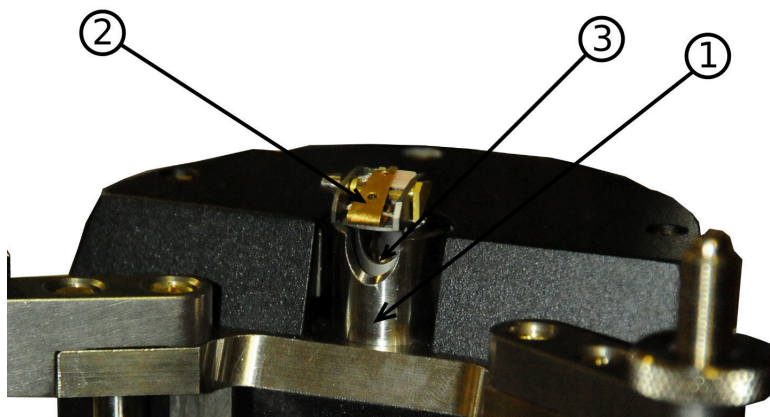
- Měřicí hlava

Přístroj NTegra Prima může být vybaven různými typy měřících hlav. Konfigurace přístroje využívaného při tomto měření obsahovalo skenující měřící hlavu (obr. 3. 4).



Obr. 3. 4 - Skenující měřící hlava.

Skenující měřící hlava má zabudovaný skener, jehož koncová část vystupuje z hlavy (1 - obr. 3. 5). Na konci této části je umístěn držák sondy (2 - obr. 3. 5). Nad držákem sondy je umístěn kruhový otvor se zrcadlem (3 - obr. 3. 5).



Obr. 3. 5 - Detail lůžka pro uložení sondy včetně vystupující části skeneru.

Vrchní část měřicí hlavy obsahuje tři šrouby, které slouží k nastavení polohy měřicí hlavy, a dvě dvojice šroubů, kterými se nastavuje poloha senzoru a laseru.

Kontrolní systém

Kontrolér je řídicí jednotkou celého systému a je složen z:

- SPM kontrolér,
- teplotní kontrolér,
- počítačová jednotka,
- software "NOVA".

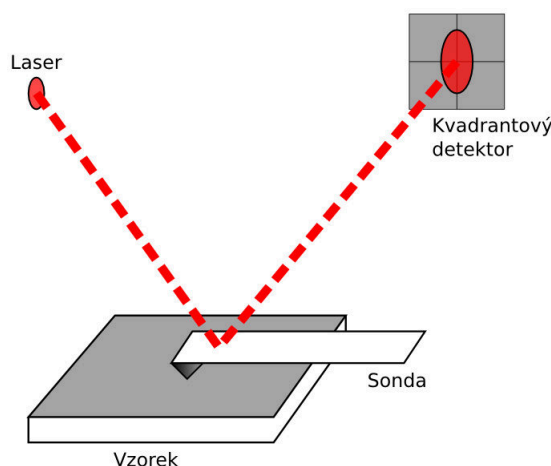
3.2 Měřicí mechanismus

Celý mechanismus měření (v našem případě metodou dvojího průchodu) zahrnuje celou řadu jednotlivých úkonů.

V prvním kroku je celá aparatura sestavena do požadované konfigurace pro daný typ měření. Sestavování a jakékoli jiné úpravy probíhají bez přivedené elektrické energie. Následuje upevnění zkoumaného vzorku. Nyní je možno všechny části mikroskopu zapnout v následujícím pořadí: počítač, SPM kontrolér, program NOVA.

Dalším krokem je upevnění sondy do držáku na spodní straně měřicí hlavy, hlava je poté umístěna nad vzorek. Abychom mohli správně měřit a nedošlo k jakémukoli poškození

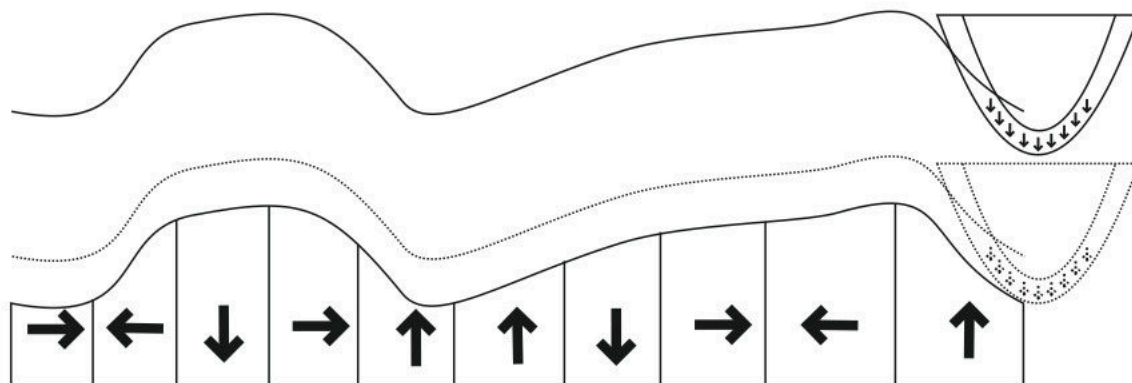
mikroskopu, je nutné nastavit a správně fokusovat laserový paprsek tak, aby docházelo k tzv. pákové detekci (obr. 3. 6). Páková detekce je mechanismus, při němž laserový paprsek dopadá na pružné raménko sondy, ze kterého se pod určitým úhlem odráží a dopadá na kvadrantový detektor. Při změně polohy raménka, vlivem interakcí hrotu s povrchem, se mění úhel odraženého paprsku, čímž se také mění pozice světelného bodu na kvadrantovém detektoru. Fokusace laserového paprsku probíhá manuálně dvěma šrouby na měřicí hlavě.



Obr. 3. 6 - Schématické znázornění mechanismu optické pákové detekce.

Nyní lze začít se samotným skenováním. V případě měření metodou MFM je však pro dosažení dobrých výsledků nutné oddělit magnetický obraz od topografie. Jak již bylo dříve uvedeno, existuje více technik jak tohoto dosáhnout (viz podkapitola 2. 4), nicméně v našem případě byla využita technika dvojího skenování [17].

Po nastavení všech potřebných parametrů se provede nejprve první průchod sondy, při kterém dochází ke skenování topografie povrchu, většinou pomocí poklepového režimu. Data obsahující informace o topografii povrchu se uloží a následně využijí jako vodící linie pro druhý průchod. Sonda je při druhém průchodu umístěna do vhodné výšky od povrchu vzorku, kdy reagují již pouze dalekodosahové magnetické síly. Druhé skenování nevyužívá poklepového režimu, jak je tomu u prvního průchodu, ale sonda je rozkmitána na své rezonanční frekvenci pomocí piezoelementu a je sledována změna fáze oscilací sondy. Výsledný magnetický obraz již není ovlivněn parazitním signálem topografie [18]. Schématicky je režim dvojího průchodu znázorněn na obr. 3. 7.



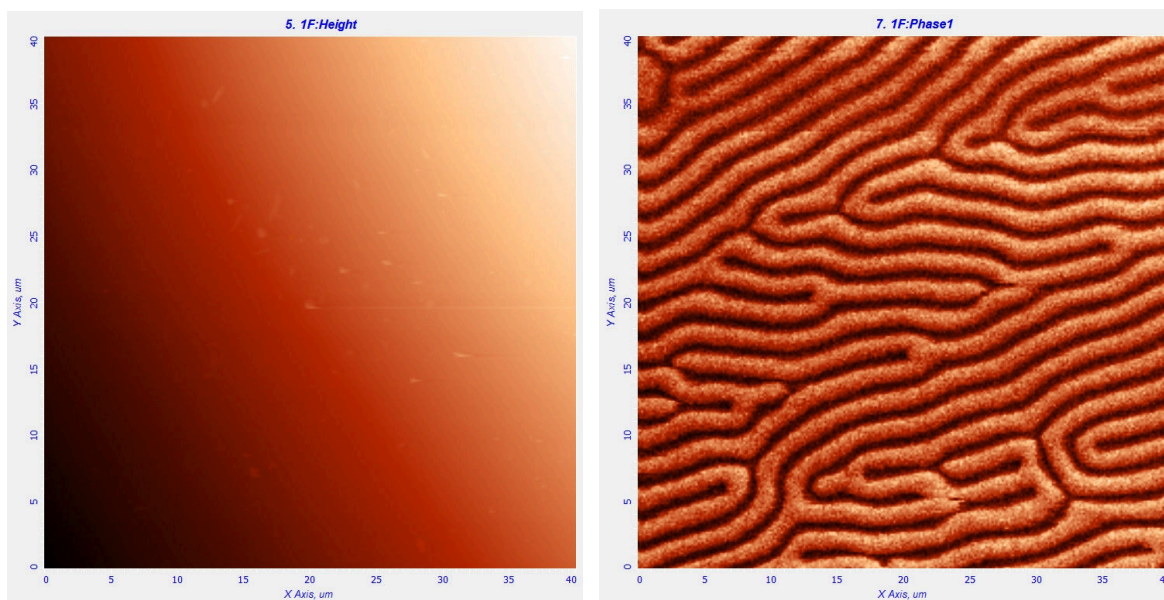
Obr. 3. 7 - Schématické znázornění mechanismu dvojího průchodu.

3.3 Granátové vrstvy (bublinkové paměti)

Zkoumané granátové vrstvy byly v minulosti hojně využívány převážně jako hlavní součást bublinkových pamětí.

Koncept magnetické bublinkové paměti byl představen v Bell Telephone Laboratories roku 1967. Výzkum ukázal, že malé válcové magnetické domény, které se nazývají magnetické bubliny, mohou být vytvořeny v monokrystalických tenkých vrstvách syntetických feritů nebo granátů, pokud působí vnější magnetické pole kolmo k povrchu filmu. Tyto bubliny mohou být laterálně posouvány skrze film pomocí využití proměnlivého magnetického pole. Vlastnosti magnetických bublinek jsou ideální pro sériové ukládání datových bitů, přítomnost nebo absence bubliny v bitové pozici definuje logický stav.

Pouze některé materiály vykazují vlastnosti nezbytné pro vytvoření magnetické bublinky, jedním z nich jsou syntetické granáty, jakožto materiál s nejlepší kombinací požadovaných vlastností. Syntetické granáty podporují vznik malých magnetických bublinek, které umožňují vysokou hustotu ukládání dat. Bublínky jsou vysoce mobilní a jsou stabilní v poměrně širokém rozsahu teplot. Nejpoužívanějším substrátem je gadolinium gallium granát (GGG) [19].



Obr. 3. 8 - Dvojice obrázků granátové vrstvy. V levé části obrázek topografie vzorku, v pravé části obrázek magnetického kontrastu. Skenovaná oblast byla $40\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$.

Ač se od výzkumu železitých granátů pro aplikace v bublinkových pamětech upouští, jde o jeden z velmi vhodných materiálů využitelných ke studiu v rámci AFM /MFM. Zejména jako referenční materiál, s jehož pomocí lze dobře optimalizovat parametry a nastavení MFM.

V našem případě byly granátové vrstvy o složení $(\text{YSmLuCa})_3(\text{FeGe})_5\text{O}_{12}$ připraveny izotermní potápěcí metodou na podložkách galito - gadolinitého granátu $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ [20]. Na přiložených obrázcích je v levé části uvedeno topografické znázornění struktury a odpovídající magnetický kontrast v daném rozlišení. Magnetický obraz znázorňuje zcela odlišnou strukturu.

3.4 Paměťová média

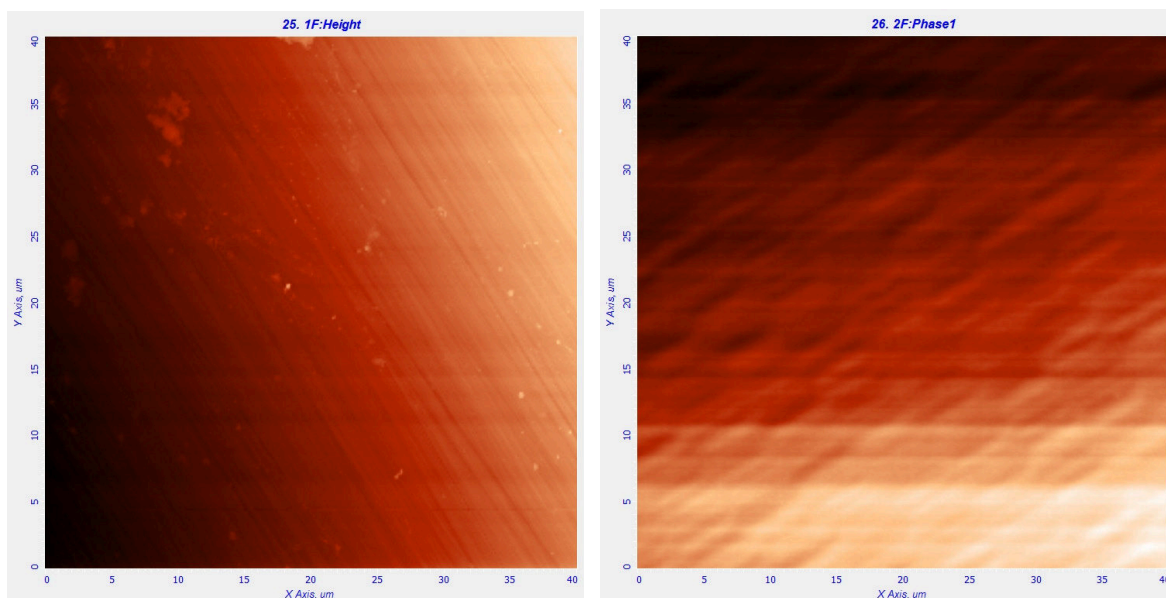
Jedním z nejzajímavějších měření pro MFM měření představuje oblast výzkumu magnetických paměťových médií [21]. Vzhledem ke směru magnetické anizotropie lze paměťové média rozdělit na longitudinální a perpendikulární. V tomto odvětví jsou bity kódovány ve smyslu polohy přechodu magnetizace. Tato poloha je ovlivněna granulární strukturou paměťového zařízení a umístěním zapisovací hlavy. Kvalita daného paměťového zařízení je pak měřena ve smyslu poměru signál vs. šum.

Vzhledem k citlivosti, jak k topografickým, tak magnetickým aspektům, je k měření těchto relací MFM nejvýhodnější.

Přiložené obrázky topografie a magnetického obrazu pocházejí z měření pevného disku, který opět slouží jako výborný referenční materiál k uzpůsobení měřících režimů MFM.

Pevný disk (HDD, z anglického Hard Disc Drive) je označení pro magnetické záznamové médium, které se využívá především v současných počítačích. Pro ukládání dat je u pevných disků využívána magnetická indukce. Data se ukládají zmagnetizováním míst na magneticky měkkém materiálu cívkou uloženou na tzv. hlavě. Následné čtení zapsaných dat probíhá také pomocí hlavy, avšak nyní za využití principu obří magnetorezistence [22].

Jak již bylo uvedeno, pevný disk je složen z hlavy, která slouží pro zápis i čtení a magneticky měkkého materiálu naneseného na keramických či kovových discích nazývaných plotny. Plotny se otáčejí vysokou rychlostí, hlava se vznáší těsně nad jejich povrchem. Při správném natočení ploten pod hlavou dochází k samotnému záznamu.



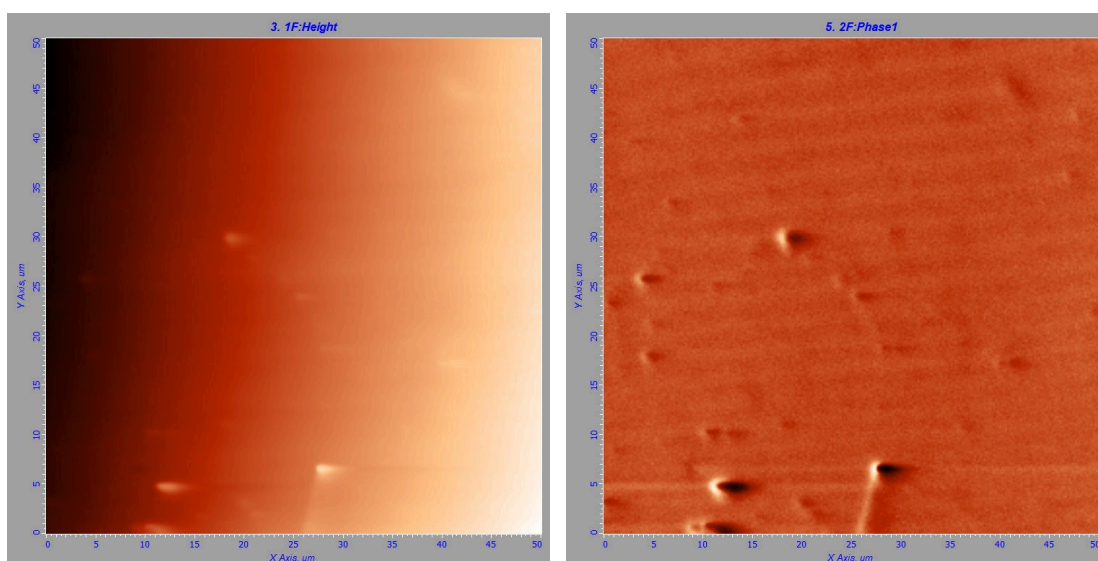
Obr. 3. 9 - Dvojice obrázků paměťového média. V levé části obrázků topografie vzorku, v pravé části obrázků magnetického kontrastu. Skenovaná oblast byla $40\text{ }\mu\text{m} \times 40\text{ }\mu\text{m}$.

3.5 FeAl

FeAl slitiny patří mezi velkou skupinu intermetalických sloučenin, které se využívají zejména díky svým výborným antikorozním a antioxidačním vlastnostem. Kombinací

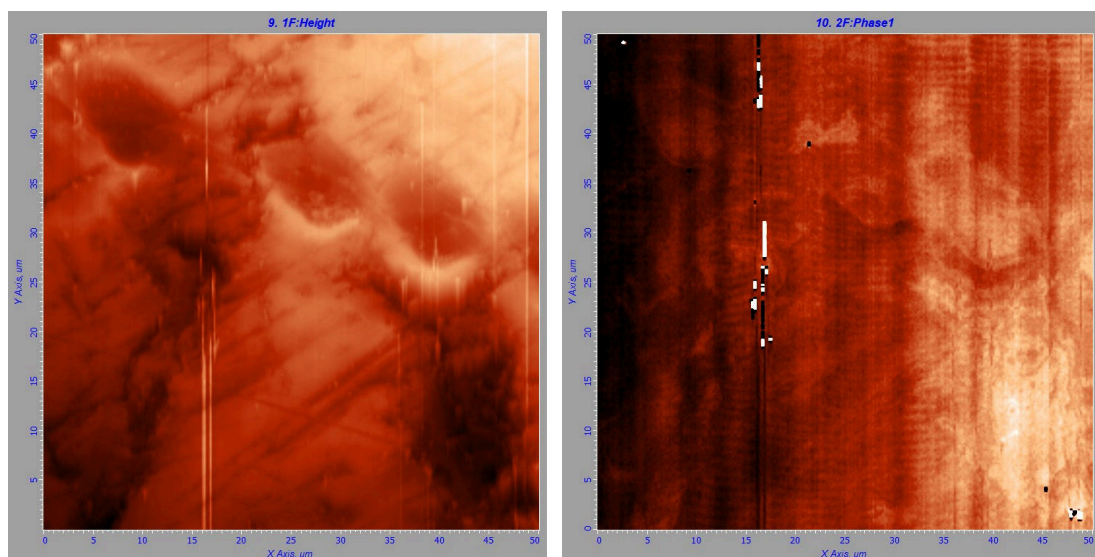
vhodných mechanických vlastností a cenové dostupnosti se stávají tyto slitiny objektem zájmu v materiálovém výzkumu, a to díky možnosti legování různými prvky jako Ni, Ta, Ti [23]. Nelze také pominout, že se rozrůstá zájem o FeAl ve vazbě na povrchovou strukturu z pohledu fyzikálních, zejména magnetických vlastností. Pochopení dějů probíhajících na povrchu materiálu s pomocí povrchově citlivých metod je proto velmi aktuální. V našem případě byly FeAl slitiny připraveny z velmi čistých prvků Fe (99.99 %) a Al (99.99 %) pomocí rovinného lití v Ar atmosféře. Vzorky byly nařezány z ingotů do formy tenkých disků o průměru 20 mm. Studovány byly zejména magnetické vlastnosti vzhledem k rozdílu mezi povrchem a objemem. Bylo zjištěno, že prezentované složky lze rozdělit do dvou základních kategorií.

1. $\text{Fe}_{72}\text{Al}_{28}$, které je feromagnetické jak na povrchu, tak v objemu.

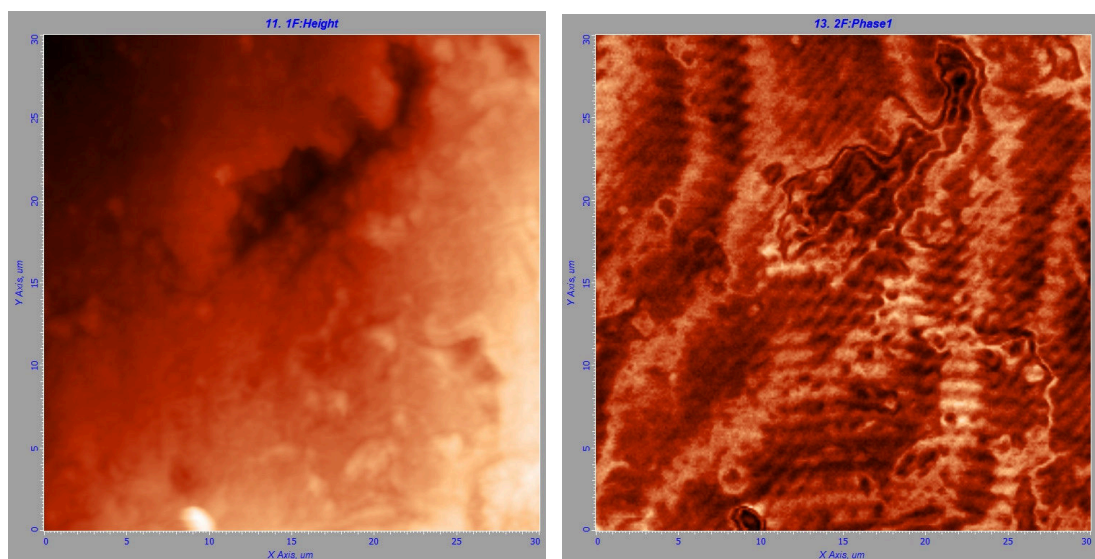


Obr. 3. 10 - Dvojice obrázků slitiny $\text{Fe}_{72}\text{Al}_{28}$. V levé části obrázků topografie vzorku, v pravé části obrázků magnetického kontrastu. Skenovaná oblast byla $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$. I přes použitou metodu dvojího průchodu lze u snímků magnetického kontrastu vysledovat příspěvek topografických efektů.

2. $\text{Fe}_{65}\text{Al}_{35}$, $\text{Fe}_{67}\text{Al}_{33}$, které vykazují v objemu paramagnetické chování.



Obr. 3. 11 - Dvojice obrázků slitiny $\text{Fe}_{67}\text{Al}_{33}$. V levé části obrázků topografie vzorku, v pravé části obrázků magnetického kontrastu. Skenovaná oblast byla $50\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$. I přes použitou metodu dvojího průchodu lze u snímků magnetického kontrastu vysledovat příspěvek topografických efektů.

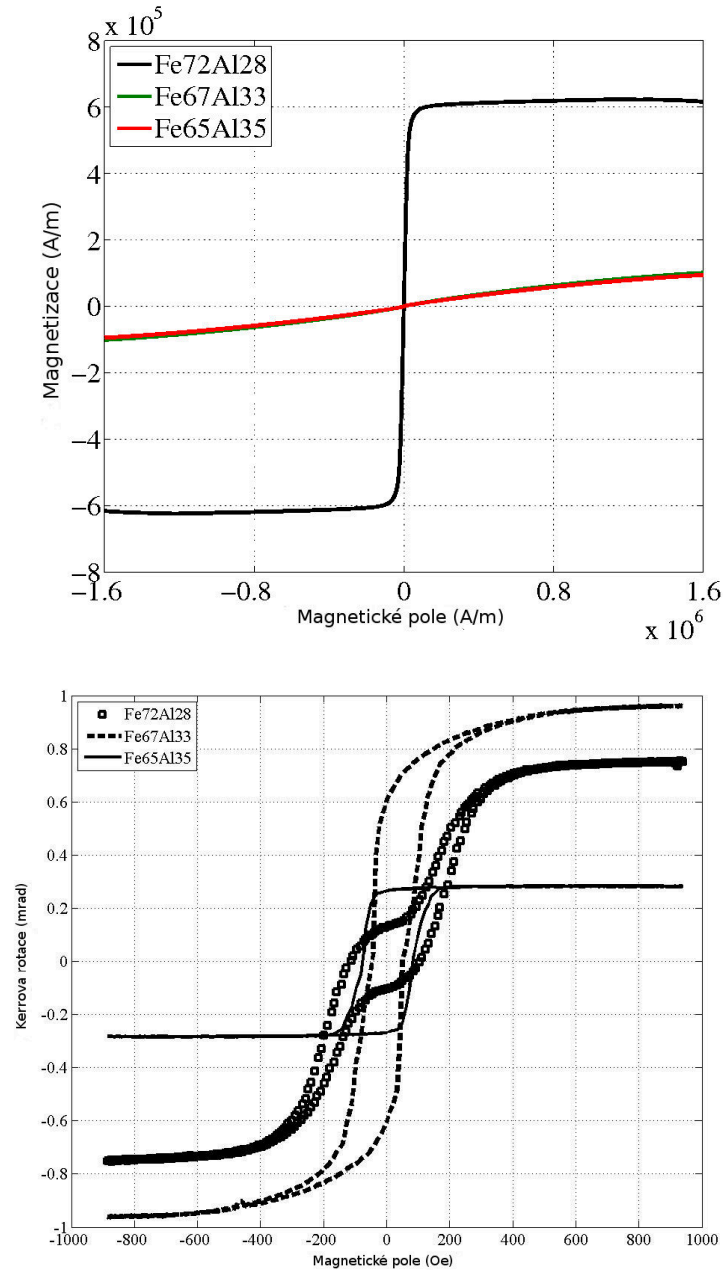


Obr. 3. 12 - Dvojice obrázků slitiny $\text{Fe}_{65}\text{Al}_{35}$. V levé části obrázků topografie vzorku, v pravé části obrázků magnetického kontrastu. Skenovaná oblast byla $30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$. I přes použitou metodu dvojího průchodu lze u snímků magnetického kontrastu vysledovat příspěvek topografických efektů.

Naměřené smyčky objemovou metodou měření magnetických vlastností VSM¹ ukazují na feromagnetické chování u slitiny $\text{Fe}_{72}\text{Al}_{28}$ a na paramagnetické chování u

¹VSM (vibrační magnetometrie) - slouží k měření hysterezních smyček v celém objemu vzorku

slitin $\text{Fe}_{67}\text{Al}_{33}$ a $\text{Fe}_{65}\text{Al}_{35}$. Měření povrchově citlivými metodami jako MOKE² a MFM však poukazují u slitin $\text{Fe}_{67}\text{Al}_{33}$ a $\text{Fe}_{65}\text{Al}_{35}$ na feromagnetické chování, což bylo potvrzeno hysterezní magnetooptickou smyčkou a kontrastem domén v MFM.



Obr. 3. 13 - Dvojice grafů hysterezních smyček slitin FeAl. V horní části hysterezní smyčka získaná pomocí VSM, v dolní části hysterezní smyčka získaná metodou MOKE.

²MOKE (Magneto-Optic Kerr Effect) - metoda využívající magnetooptický Kerrův jev, slouží zejména k měření hysterezních smyček [24]

Výzkum v této oblasti stále pokračuje [25], přičemž se budeme snažit o vysvětlení těchto zajímavých jevů. Vysvětlení by mohlo spočívat v tom, že FeAl s rostoucím množstvím hliníku (Al_{28} - Al_{35}) ztrácí magnetický moment a atomy železa se přeskupují do povrchových vrstev a tvoří tak feromagnetickou vrstvu.

4. Závěr

Bakalářská práce si kladla za cíl využít techniku AFM / MFM ke studiu povrchových a magnetických vlastností různých typů materiálů, dále se pak důkladně seznámit s obsluhou SPM mikroskopu NTegra Prima a na této platformě charakterizovat povahy vzorků (granátové vrstvy, paměťová média), které jsou de facto referenčními (dobře měřitelnými z pohledu MFM) materiály. MFM bylo dále využito ke studiu FeAl intermetalických slitin v různém složení, a to v rámci pokračujícího výzkumu, který se věnuje spojení mezi povrchovými magnetickými vlastnostmi, povrchovou strukturou a fázovým složením, s pomocí dalších metod (VSM, MOKE, CEMS a další).

5. Literatura

- [1] Klapetek, P. - Buršík, J. - Valtr, M. - Martinek, J. Near-field scanning optical microscope probe analysis. *Ultramicroscopy*, 2008, vol. 108, no. 7, s. 671-676.
- [2] Binnig, G. - Rohrer, H. - Gerber, C. - Weibel, E. Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Physical Review Letters*, 1982, vol. 49, no. 1, s. 57-61.
- [3] Binnig, G. - Quate, C. - Gerber, C. Atomic force microscopy. *Physical Review Letters*, 1986, vol. 56, no. 9, s. 930-933.
- [4] Kubínek, R. - Vůjtek, M. - Mašlán, M. *Mikroskopie skenující sondou*. Univerzita Palackého v Olomouci, 2003. ISBN 80-244-0602-0.
- [5] Martin, Y. - Wickramasinghe, H. K. Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution. *Applied Physics Letters*, 1987, vol. 50, no. 20, s. 1455-1458.
- [6] De Lozanne, A. Application of Magnetic Force Microscopy in Nanomaterials Characterization. *Microscopy Research and Technique*, 2006, vol. 69, no. 7, s. 550-562.
- [7] Wickramasinghe, H. K. Progress in scanning probe microscopy. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, no. 1, s. 347-358.
- [8] Hendrych, A. - Kubínek, R. - Vůjtek, M. Mikroskopie magnetických sil. *Jemná mechanika a optika*, 2007, vol. 52, s. 79-86.
- [9] Wiesendanger, R. - Güntherodt, H. -J. *Scanning Tunneling Microscopy II*. Springer, 1995. ISBN 978-35-4058-589-3.
- [10] Stifter, T. - Marti, O. - Bhushan, B. Synthesis, Theoretical investigation of the distance dependence of capillary and van der Waals forces in scanning force microscopy. *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 62, no. 20, s. 13667-13673.
- [11] Vybíral, B. *Elektrostatika* [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <<http://fyzikalniolympiada.cz/texty/elstat.pdf>>.
- [12] Hendrych, A. *Magnetické vlastnosti nanokompozitních materiálů*. Univerzita Pa-

lackého v Olomouci, 2009. 73 s, 11 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

[13] WADAS, A. - GRÜTTER, P. Theoretical approach to magnetic force microscopy. *Phys. Rev. B*, 1989, vol. 39, no. 16, s. 12013-12017.

[14] SCHÖNENBERGER, C. - ALVARADO, S. F. - LAMBERT, S. E. - SANDERS, I. L. Separation of magnetic and topographic effects in force microscopy. *Journal of Applied Physics*, 1990, vol. 67, no. 12.

[15] FOLKS, L. - WOODWARD, R. C. The use of MFM for investigating domain structures in modern permanent magnet materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1998, vol. 190, no. 1-2, s. 28-41.

[16] *NTEGRA Prima* [online]. 1998, [cit. 2013-05-15]. Dostupné z:

<<http://www.ntmdt.com/device/prima-ii>>.

[17] *AC MFM* [online]. 1998, [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <<http://www.ntmdt.com/spm-principles/view/ac-mfm>>.

[18] GOMEZ, R. D. - ANDERSON, A. J. - MAYERGOYZ, I. D. Combined Magnetic, Electric and Topographic Microscopy of Microfabricated Meter Lines - Qualification of MFM Force Response. *MMM - Intermag Conference*, 1998, vol. 15, no. 15, s. 6-9.

[19] *Magnetic Bubbles Introduction* [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z:

<http://www.gitam.edu/eresource/Engg.Phys/semester_2/magnetic/magbubble.htm>.

[20] BOK, J. - KUČERA, M. - NITSCH, K. - PAŘÍZEK, V. - PIŠTORA, J. - PROSSER, V. - SVOBODOVÁ, L. - VIŠŇOVSKÝ, Š. *Optické vlastnosti krystalů a tenkých vrstev granátů*. Výzkumná zpráva, Fyzikální ústav UK. 1983.

[21] RUGAR, D. - MAMIN, H. J. - GUETHNER, P. - LAMBERT, S. E. - STERN, J. E. - MCFADYEN, I. - YOGI, T. Magnetic force microscopy: General principles and application to longitudinal recording media. *Journal of Applied Physics*, 1990, vol. 68, no. 3, s. 1169-1183.

[22] RAO, C. N. R. - MAHESH, R. Giant magnetoresistance in manganese oxides. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1997, vol. 2, no. 1, s. 32-39.

[23] STOLOFF, N. S. Iron aluminides: present status and future prospects. *Materials Science and Engineering*, 1998, vol. 258, no. 1, s. 1-14.

[24] *An Introduction to MOKE* [online]. 1995, [cit. 2013-05-15]. Dostupné z:

<<http://www.uksaf.org/tech/moke.html>>.

[25] JIRÁSKOVÁ, Y. - HENDRYCH, A. - ŽIVOTSKÝ, O. - BURŠÍK, J. - ŽÁK, T. - PROCHÁZKA, I. - JANIČKOVIČ, D. Surface magneto-optical and Mössbauer observations of Fe-Al. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 276, s. 68-75.

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Nanotechnologie - báze pro mezinárodní spolupráci, reg. č. CZ. 1.07/2.3.00/20.0074 podpořeného operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost, financovaného ze strukturálních fondů EU a státního rozpočtu. Poděkování dále směřuji na projekt IT4 INNOVATIONS, Centrum excellence za jehož finanční podpory byl zakoupen přístroj Ntegra Prima. (CZ.1.05/1.1.00/02.0070) Rád bych také poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Aleši Hendrychovi, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady při vypracování této bakalářské práce.